

相移阴影叠栅实时标定技术

颜菁菁, 杜虎兵

西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 相移阴影叠栅轮廓术具有分辨力高和可自动测量的特点,但该技术需要预先对测量灵敏度进行标定,实现过程复杂。为了简化其标定过程,提出一种基于3帧条纹图的实时测量灵敏度标定技术。所提方法利用垂直光栅面精确移动光栅,获得3帧相移条纹图;再通过不同帧条纹图相减去除条纹图背景,发展了一种基于矩阵范数的相移算法,提取了引入的相移;利用相移与测量灵敏度间的关系实现了测量灵敏度的快速标定。实验结果表明,所提方法操作简单,应用灵活,并且为测量灵敏度的标定提供了一种闭合解,其标定精度优于传统的Dirckx方法。

关键词 测量; 光学三维测量; 标定; 阴影叠栅轮廓术; 相移

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.091202

Real-Time Calibration Technique for Phase Shift Shadow Moiré

Yan Jingjing, Du Hubing

School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract Phase shift shadow moiré profilometry technique has the characteristics of the high definition and automatic measurement, but it requires the calibration for the measurement sensitivity in advance, and the implementation process is complicated. In order to simplify the calibration process, a calibration technique to measure sensitivity in real time based on three frame fringe patterns is proposed. A grating is shifted with vertical grating plane precisely and three frame phase shift fringe patterns are obtained. The fringe pattern background is removed by the subtraction between different frame fringe patterns. A phase shift algorithm based on the matrix norm is developed to extract the introduced phase shift. Rapid calibration of measurement sensitivity is obtained based on the relationship between phase shift and measurement sensitivity. Experiment results show that the proposed method is simple, flexible and can provide a closed-form solution for the calibration of measurement sensitivity. The calibration precision of the proposed method is better than that of the traditional Dirckx method.

Key words measurement; optical three-dimensional measurement; calibration; shadow moiré profilometry; phase shift

OCIS codes 120.2650; 120.3940; 120.4120

1 引言

光学三维(3D)轮廓测量技术因具有全场、非接触的特点,在工业生产中,如工业检测、反求工程以及物体识别等场合,得到了广泛的应用。其中,阴影叠栅3D轮廓测量技术是该类技术的典型代表。传统的阴影叠栅装置结构简单,主要包括一个普通光源、一块矩形光栅和一个CCD摄像机。测量时,将被测物体置于光栅下^[1],当光源照射光栅时,光栅的阴影被投射至物体表面,该阴影光栅受物体表面形状的调制,形成变形光栅。此时,以不同于光源照射的方向进行观测时,在光栅和阴影光栅的交叠作用下会形成一系列叠栅条纹。叠栅条纹具有物体表面形貌信息,对其进行解调可得到物体表面高度分布。传统的阴影叠栅技术主要基于

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(61471288, 51475351)、陕西省自然科学基金(2015JM5190)

作者简介: 颜菁菁(1991—),女,硕士研究生,主要从事光电检测和干涉图分析等方面的研究。

E-mail: memandcon@126.com

导师简介: 杜虎兵(1976—),男,博士,副教授,主要从事光电检测、实时在线测试以及机器视觉方面的研究。

E-mail: duhubing@xatu.edu.cn(通信联系人)

等高线法,该方法简单、可靠,但是需要人工参与,其分辨力仅限于一个叠栅条纹间距。为了提高阴影叠栅技术的测量分辨力,基于相移技术的阴影叠栅法得到了广泛的应用^[2-8]。相移技术能充分利用条纹图中的灰度变化信息,可识别分数级叠栅条纹间距^[7],因此,目前已经成为阴影叠栅技术中的主流技术。需指出,应用相移技术获得的只是被测物表面的相位信息。为了实现高度测量,还需要进一步将测量相位映射至高度空间,其过程与测量装置的测量灵敏度标定密切相关。测量灵敏度的标定通常使用已知高度分布的标定块,该方法需要额外制造标定块,费时费力。Dirckx 等^[9]提出了一种仅依赖叠栅测量装置自身的标定方法。在 Dirckx 方法中,通过移动物体可使测量视场产生时域光强变化,进而得到某一观测点光强变化与物体移动距离的关系曲线以及光强变化一个周期时物体移动的距离(即测量灵敏度)。Dirckx 方法简单、易行,但是随着应用领域对阴影叠栅技术测量精度要求的提高,传统的阴影叠栅技术需要发展成为高灵敏度阴影叠栅技术^[10],因此测量系统中的细光栅(光栅周期范围为 0.025~0.2 mm)得到了应用。此时,测量装置的动态范围受泰伯效应的影响明显减小。如果应用移动物体的方法在测量视场产生光强变化,物体极易移出测量装置的动态范围,因此该方法难以在高灵敏度阴影叠栅技术中得到足够多的时域条纹图。最近,Du 等^[11]提出了一种基于主量分析法^[12]的阴影叠栅测量灵敏度标定方法,该方法对阴影叠栅技术进行了改进,并得到了较好的效果。然而,该方法要求应用相位解包裹得到相邻帧相移条纹图的相位,进而获得引入的相移,其过程需要较多的计算时间。此外,在应用中,该方法仍要求采集较多帧的相移条纹图,并要求引入的相移量分布在 $[0, 2\pi]$ 的范围内,以便有效地通过时域平均的方法去除条纹图背景,并满足文献^[12]中(18)式的应用条件。

综上所述,现有的相移阴影叠栅灵敏度标定技术不易实现且缺少灵活性。为了进一步简化灵敏度标定过程,本文提出一种基于 3 帧相移条纹图的标定方法,该方法简单有效,克服了上述方法中存在的问题,并且可以在测量过程中进行测量灵敏度标定,具有实时标定的优势。

2 原 理

2.1 相移阴影叠栅轮廓术

在点光源入射下的阴影叠栅测量的原理如图 1 所示,光源与相机位于同一高度($h_1 = h_2 = h$)处,间距为 d ,光源发出的光透过周期为 p 的矩形光栅并投射到被测物表面。受物体表面形貌的调制,被测物表面产生了变形阴影光栅。因此,在不同于光源投射方向上观测时,在实光栅与阴影光栅栅线的交叠作用下,相机便得到了一系列的阴影叠栅条纹图,周期为 p' 。

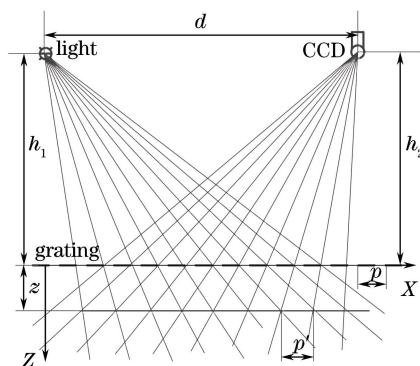


图 1 阴影叠栅原理图

Fig. 1 Schematic diagram of shadow moiré

通常相机观察到的光强可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \frac{dz}{h+z} \cos \frac{2\pi}{p}, \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为振幅。(1)式中第 2 项为轮廓项,携带物体表面形貌信息。利用精密位移台在垂直光栅平面移动光栅 2 次,每次移动的间距为 Δh ,可得

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + n\Delta(x, y)], \quad (2)$$

式中 $n=0, 1, 2$, $\phi(x, y)$ 为相位, $\Delta(x, y)$ 为引入的相移增量。 $\phi(x, y)$ 和 $\Delta(x, y)$ 可分别表示为^[7]

$$\phi(x, y) = 2\pi dz / [p(h + z)], \quad (3)$$

$$\Delta(x, y) = 2\pi d \Delta h / [p(h + z)]. \quad (4)$$

(4)式表明,引入的相移与高度有关。通过实验装置的参数设计可以保证 $h \gg z$, 引入的相移增量可简化为

$$\delta = 2\pi d \Delta h / (ph). \quad (5)$$

如果测量相位已知,则可得

$$z(x, y) = \frac{ph}{2\pi d} \phi(x, y) = \frac{s}{2\pi} \phi(x, y), \quad (6)$$

式中 s 为测量灵敏度,对照(5)式可得

$$s = \frac{2\pi \Delta h}{\delta}. \quad (7)$$

(7)式表明,如果测量视场引入的相移增量可确定,便可得到测量灵敏度。

2.2 确定测量灵敏度

为了得到测量灵敏度,将(2)式改写为

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + n\delta]. \quad (8)$$

为了表述清楚,后面的推导均省略了坐标 (x, y) 。对(8)式作差可得

$$\begin{cases} I_{n_1} = (I_0 - I_1)/2 = B \sin(\delta/2) \sin(\phi + \delta/2) = B' \sin \phi \\ I_{n_2} = (I_1 - I_2)/2 = B \sin(\delta/2) \sin(\phi + 3\delta/2) = B' \sin(\phi + \delta) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 I_{n_1} 、 I_{n_2} 代表相邻两帧条纹作差产生的新条纹图, n_1 、 n_2 为时域条纹图号, $B' = B \sin(\delta/2)$ 。进一步推导可得

$$\begin{cases} I_s = (I_{n_2} - I_{n_1})/2 = B' \sin(\delta/2) \cos(\phi + \delta/2) \\ I_a = (I_{n_2} + I_{n_1})/2 = B' \cos(\delta/2) \sin(\phi + \delta/2) \end{cases}, \quad (10)$$

式中 I_s 和 I_a 分别为对新条纹图进行和、差运算的结果。在测量过程中,由于所采集条纹图的条纹数目大于1,因此有

$$\begin{aligned} & \| B \sin(\phi + \delta/2) \| - \| B \cos(\phi + \delta/2) \| = \sum \sum [B^2 \sin^2(\phi + \delta/2) - B^2 \cos^2(\phi + \delta/2)] = \\ & \sum \sum B^2 [\sin(\phi + \delta/2) + \cos(\phi + \delta/2)] [\sin(\phi + \delta/2) - \cos(\phi + \delta/2)] = \\ & \sum \sum B^2 \sin(2\phi + \delta - \pi/2) \approx 0, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\| M(x, y) \| = \sqrt{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n M(x, y)^2}$ 为矩阵范数运算, m 、 n 表示矩阵大小。结合(10)、(11)式可得两个范数之比为

$$k = \frac{\| I_s \|}{\| I_a \|} = \frac{\sin(\delta/2) \| B \cos(\phi + \delta/2) \|}{\cos(\delta/2) \| B \sin(\phi + \delta/2) \|} = \tan(\delta/2), \quad (12)$$

因此

$$\delta = 2 \arctan k. \quad (13)$$

应当指出,(13)式表明文中基于矩阵范数的相移提取方法是根据空域条纹图数计算的结果,不是根据某一固定数据点计算的结果,因此具有平均意义。

3 实 验

为了验证上述分析的正确性,进行了实验验证。实验系统如图2所示。摄像机光轴与光栅平面垂直,相机与光源连线垂直于光栅栅线主方向。光栅为 Ronchi 光栅,具有20条刻线。光源与相机的距离为100 mm。相机光心与光栅表面的距离为120 mm,光栅水平放置,光源与相机镜头光心位于同一水平面。

关于阴影叠栅装置结构参数的标定方法见文献[13]。待测物为一硅晶片,其一端水平放置,另一端垫高约0.2 mm,形成一个角度很小的斜面。由于被测斜面角度很小,避免了衍射对实验的影响^[14-15]。为了提高测量精度,采用高精度位移平台作为相移器,其分辨率为1 μm 。

实验时,首先调整光栅的位置,使其靠近待测物体,相机便可观察到清晰的叠栅条纹^[16]。然后以此位置为基准位置,在垂直光栅面方向上使用精密位移台移动光栅,每次移动的距离为0.01 mm,每次的相移约为 $\pi/4$,如此移动光栅35次,便可得到一系列叠栅条纹图。图3给出了实验中光栅每移动0.01 mm后,摄取的前6帧条纹图。图4为记录的某一观测点光强与光栅移动距离的时域变化曲线,可以看出图中光强变化具有周期性。根据文献[9],光强变化一个周期,光栅移动的距离即为测量灵敏度。

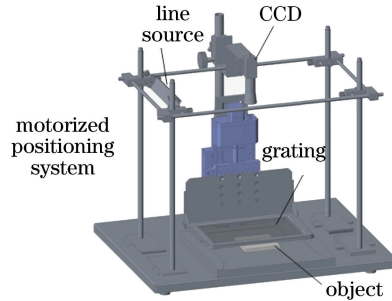


图2 实验系统示意图

Fig. 2 Diagram of experimental system

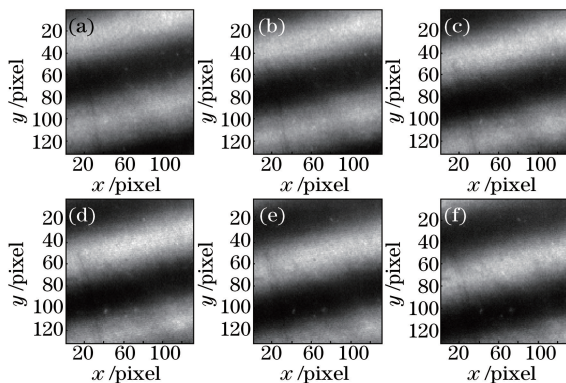
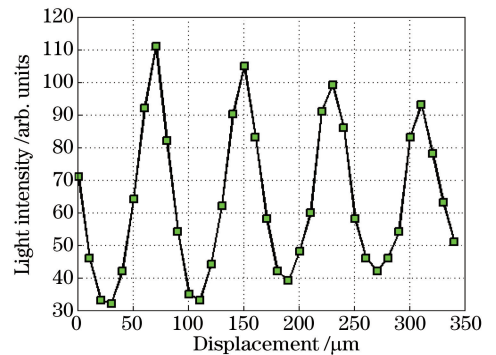
图3 相移叠栅条纹图。(a)第1帧;(b)第2帧;
(c)第3帧;(d)第4帧;(e)第5帧;(f)第6帧Fig. 3 Phase shift Moiré fringe patterns. (a) 1st frame;(b) 2nd frame; (c) 3rd frame; (d) 4th frame;(e) 5th frame; (f) 6th frame

图4 观测点时域光强变化曲线

Fig. 4 Variation curve of light intensity in time domain of observation point

表1为标定相移的实验结果。受反正切函数值域的限制,该方法仅可直接确定 $0\sim\pi$ 范围内的相移。若要获得 $0\sim\pi$ 范围之外的相移,则需要进行额外的相位去包裹处理。因此按照实验方法,可以获得4个无需相位去包裹的测量结果。表1给出了所提方法确定的相移与理论相移间的误差。实验数据表明,光栅移动量的增加会导致累积误差的产生,但第一次所得的相移表明所提方法具有足够高的测量精度。

表1 标定的相移

Table 1 Calibrated phase shift

rad

Parameter	Calibrated phase shift			
	No.1	No.2	No.3	No.4
Actual phase shift	0.8034	1.6542	2.2814	3.0216
Theoretical phase shift	0.7850	1.5700	2.3550	3.1400
Error	0.0184	0.0842	0.0736	0.1284

为了对比说明所提方法的性能,应用Dirckx方法对测量灵敏度进行了独立的4次实验。采用随机抽取

的方式获得计算数据点,以保证实验结果不是某一固定点的结果,如表 2 所示。表 2 中给出了标定的灵敏度与理论灵敏度(0.08 mm)之间的误差。由表 2 可以看出,与传统的 Dirckx 方法相比,该方法获得了相对较高的测量精度。

表 2 标定的灵敏度

Table 2 Calibrated sensitivity

mm

Method	Calibrated sensitivity			
	No.1	No.2	No.3	No.4
Proposed method	0.0782	0.0760	0.0826	0.0832
Error of proposed method	0.0018	0.0040	0.0026	0.0032
Dirckx method	0.0830	0.0840	0.0840	0.0850
Error of Dirckx method	0.0030	0.0040	0.0040	0.0050

4 结 论

针对相移阴影叠栅轮廓术中灵敏度标定存在的问题进行了研究,提出了一种基于 3 帧相移条纹图的测量灵敏度标定方法,简化了本课题组之前所提出的标定方法。该方法通过对 3 帧条纹图作差,去除条纹图背景,然后利用灵敏度与相移的关系精确地标定了测量灵敏度。实验结果表明,所提方法不受条纹图背景误差的影响,可以精确、方便地确定测量灵敏度,克服了现有标定方法存在的问题。该研究为阴影叠栅技术测量灵敏度的标定提供了一种有效的途径。

参 考 文 献

- [1] Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by Moiré patterns[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(4): 942-947.
- [2] Dirckx J J J, Decraemer W F, Dielis G. Phase shift method based on object translation for full field automatic 3-D surface reconstruction from Moiré topograms[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(6): 1164-1169.
- [3] Mauvoisin G, Brémand F, Lagarde A. Three-dimensional shape reconstruction by phase-shifting shadow Moiré[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(11): 2163-2169.
- [4] Xie X J, Atkinson J T, Lalor M J, *et al.* Three-map absolute Moiré contouring[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(35): 6990-6995.
- [5] Yoshizawa T, Tomisawa T. Shadow Moiré topography by means of the phase-shift method[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(7): 1668-1674.
- [6] Jin L H, Kodera Y, Yoshizawa T, *et al.* Shadow Moiré profilometry using the phase-shifting method[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(8): 2119-2123.
- [7] Degrieck J, Paepegem W V, Boone P. Application of digital phase-shift shadow Moiré to micro deformation measurements of curved surfaces[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(1): 29-40.
- [8] Du H B, Zhao H, Li B, *et al.* Phase-shifting shadow Moiré based on iterative self-tuning algorithm[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(36): 6708-6712.
- [9] Dirckx J J J, Decraemer W F. Automatic calibration method for phase shift shadow Moiré interferometry[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(10): 1474-1476.
- [10] Han C W, Han B. High sensitivity shadow Moiré using nonzero-order Talbot distance[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 46(4): 543-554.
- [11] Du H B, Wang J H, Zhao H, *et al.* Calibration of the high sensitivity shadow Moiré system using random phase-shifting technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 63: 70-75.
- [12] Vargas J, Quiroga J A, Belenguer T. Analysis of the principal component algorithm in phase-shifting interferometry[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(12): 2215-2217.
- [13] Gu F F, Du H B, Zhao H, *et al.* Phase extraction from random phase-shifted shadow Moiré fringe patterns using stereovision technique[C]. *SPIE*, 2013, 8681: 868129.
- [14] Ai Yongxu, Zhou Xiang, Du Hubing, *et al.* Shadow Moiré using Talbot effect under point light illumination[J]. *Acta*

Optica Sinica, 2016, 36(4): 0412003

艾永旭, 周翔, 杜虎兵, 等. 点光源下的 Talbot 效应在阴影叠栅中的应用[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0412003.

- [15] Ai Yongxu, Zhou Xiang, Du Hubing, *et al.* A multi-range merging method for phase shift shadow Moiré profilometry with large depth measuring range[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1212001.

艾永旭, 周翔, 杜虎兵, 等. 一种多距离融合的大深度测量范围相移阴影叠栅轮廓术[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1212001.

- [16] Du Hubing, Ai Yongxu. Phase shift shadow Moiré demodulation based on normalized principal component analysis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 100501.

杜虎兵, 艾永旭. 基于正则化主量分析的相移阴影叠栅解调技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 100501.